

# MEDICIÓN DE HUMEDAD EN SÓLIDOS POR MICROONDAS

C.D. Avilés, I. García, J.M. Arias

Centro Nacional de Metrología, División de Mediciones Electromagnéticas  
km 4.5 carretera a los Cués, el Marqués, Qro., Méx., C.P. 76900

Tel: (4) 2-11-05-00, Fax: (4) 2-11-05-48, Email: [caviles@cenam.mx](mailto:caviles@cenam.mx), [igarcia@cenam.mx](mailto:igarcia@cenam.mx)

**Resumen:** El artículo trata sobre el desarrollo de un método de medición basado en antenas de corneta que permite la medición de la humedad de muestras sólidas usando señales electromagnéticas en el intervalo de 8 GHz a 18 GHz. Las principales ventajas de la medición de humedad por microondas usando antenas de corneta son que el sistema permite realizar mediciones de manera instantánea y sin contacto físico con la muestra a medir, por lo que es posible su utilización para realizar mediciones en línea. Para validar el método de medición se muestran algunos resultados sobre muestras de sílica gel medidas por el método de las antenas de corneta calibrado en base a mediciones gravimétricas las cuales se comparan con el método de medición de humedad usando una balanza de infrarrojo.

## INTRODUCCION

La medición de humedad en materiales sólidos tiene diversas aplicaciones, algunas de ellas son:

El control del contenido de humedad en alimentos, que es importante para evitar su descomposición durante el almacenamiento.

El contenido de humedad en cereales tiene una clara importancia comercial ya que el precio por tonelada depende del contenido de humedad.

Algunas características físicas de los materiales de construcción como su resistencia mecánica dependen de la humedad.

El contenido de agua de una muestra sólida puede ser determinado indirectamente por medio de mediciones de permitividad. La permitividad caracteriza la interacción de la componente de campo eléctrico de una onda electromagnética con la

$$\mathbf{e}_r = 1 + \frac{\overset{\circ}{P}}{\mathbf{e}_0 \mathbf{E}} = \mathbf{e}' - j\mathbf{e}''$$

- $\mathbf{e}_r$  - Permitividad relativa
- $\mathbf{E}$  - Campo eléctrico aplicado
- $\overset{\circ}{P}$  - Polarizabilidad
- $\mathbf{e}_0$  - Permitividad del vacío
- $\mathbf{e}'$  - Constante dieléctrica
- $\mathbf{e}''$  - Factor de pérdidas

La polarizabilidad depende de la capacidad de los dipolos existentes en la muestra de girar en la dirección del campo eléctrico aplicado y de la densidad de dipolos contenidos en la muestra. El agua es una molécula polar por lo que su permitividad es elevada ( $\epsilon' = 78.3$  para  $f < 1$  GHz).

Se puede considerar a una muestra húmeda como una mezcla de la muestra seca con agua. Hay muchas teorías para determinar la permitividad de una muestra a partir de la permitividad de sus componentes, en el caso que nos ocupa, es de esperarse que la permitividad de una muestra sólida aumente su permitividad al aumentar su humedad, debido a que en general la permitividad del agua es mucho mayor a la de la muestra seca.

## PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Se construyó una cámara con cerrado hermético dentro de la cual se colocó un vaporizador de tipo comercial y un vibrador con la intención de que las muestras a estudiar (en forma de polvo) se mantuvieran en movimiento en una atmósfera húmeda. El tiempo de permanencia de la muestra en esta cámara nos permite variar de manera controlada su humedad. La siguiente gráfica muestra la relación entre el tiempo de humectación contra la humedad obtenida en una muestra de sílica gel.

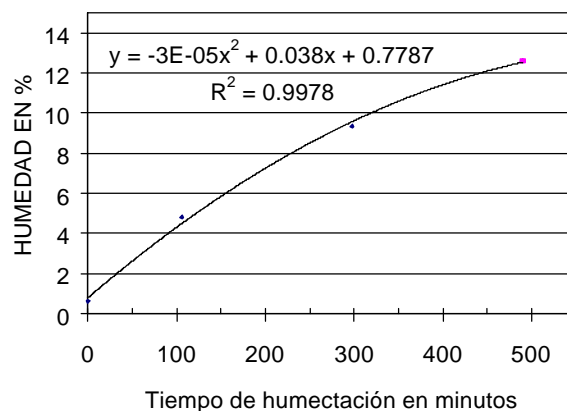
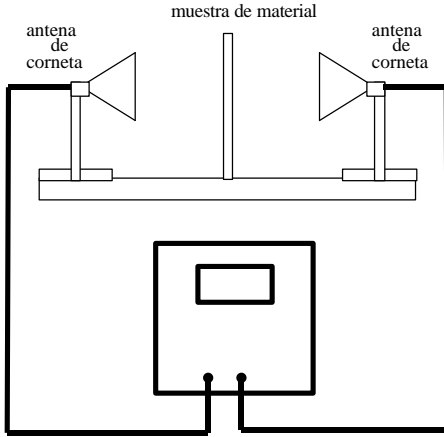


Figura 1. Humectación de la muestra de sílica gel.

## TÉCNICA DE MEDICIÓN



**Figura 2. Sistema de medición formado por un analizador de redes y antenas de corneta.**

Se radia una onda electromagnética utilizando una antena de corneta sobre la muestra de material a medir, con otra antena de corneta se recibe la onda que se ha propagado a través del material. La onda electromagnética que atraviesa el material a medir sufre una atenuación y un cambio de fase que se caracterizan con el coeficiente de transmisión  $t$ .

$$t = T e^{jq} = e^{-gd}, \quad (2)$$

Donde:  $g$ - constante de propagación  
 $d$ - ancho de la muestra

Este coeficiente de transmisión se mide con un analizador de redes y a partir de él se puede calcular la constante de propagación en la muestra de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$g = -\frac{1}{d} \ln(T) - j\frac{1}{d}(q + 2pk) = a + jb \quad (3)$$

La permitividad de la muestra se calcula a partir de la constante de propagación de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

$$e' = \left(\frac{I_0}{2p}\right)^2 (a^2 + b^2) \quad (4)$$

$$e'' = e' \left\{ \left[ \frac{2}{e'} \left(\frac{I_0 a}{2p}\right)^2 + 1 \right]^2 - 1 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

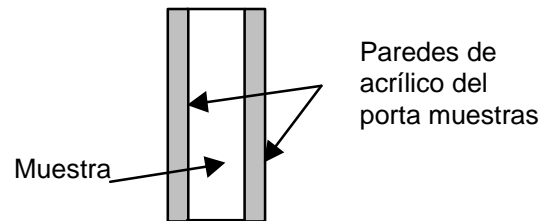
$\lambda_0$  - Longitud de onda en el vacío

## Calibración del sistema de medición

La calibración de sistema de medición descrito se efectuó mediante la técnica TRL ("thru-reflect-line") [3]. Esta es una técnica de calibración de dos puertos basada en líneas de transmisión que se adapta muy bien a la técnica de medición con antenas de corneta. El procedimiento de calibración es el siguiente: Se mide la respuesta en frecuencia y el acoplamiento de los puertos en ambas direcciones quitando el portamuestras ("thru"); luego se coloca una placa conductora en el lugar de la muestra y se mide el coeficiente de reflexión ("reflect"); posteriormente se retira la placa conductora, se separan las antenas una distancia predeterminada midiéndose la respuesta en frecuencia y el acoplamiento de los puertos en ambas direcciones ("line"). Como se conocen las características eléctricas del "thru", del "reflect" y de la "line" se esperan ciertos valores conocidos de las mediciones antes descritas. Las diferencias entre los coeficientes de reflexión y de transmisión medidos contra los esperados sirven para calcular los coeficientes de error que se utilizan para corregir las mediciones por desacoplamientos, atenuaciones parásitas y respuesta en frecuencia de los componentes del sistema de medición [5].

## Corrección del efecto del porta-muestras

El porta-muestras consiste en un paralelepípedo de acrílico de 20 cm X 20 cm X 6 mm que permite contener muestras sólidas en forma de polvo o líquidas. Para medir la permitividad de la muestra es necesario corregir las mediciones del coeficiente de transmisión ya que en parte la atenuación y cambio de fase de la onda transmitida se deben al portamuestras cuya permitividad es diferente de la del aire y de la muestra a medir. Esta corrección se efectúa de la siguiente manera:



**Figura 3. Muestra y porta-muestras**

Se midió la matriz de parámetros S de una de las paredes de acrílico del porta-muestras:

$$S_{PM} = \begin{bmatrix} S_{PM11} & S_{PM12} \\ S_{PM21} & S_{PM22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Se definió una matriz de parámetros **S** similar para la muestra  $S_M$ , la cual se quiere determinar. Se determinaron las matrices de parámetros **T** correspondientes al porta muestras  $S_{PM}$  y a la muestra  $S_M$  mediante la fórmula de conversión siguiente [4]:

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{S_{21}} \begin{bmatrix} S_{12}S_{21} - S_{11}S_{22} & S_{11} \\ -S_{22} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Obteniéndose las matrices correspondientes  $T_{PM}$  y  $T_M$ .

Al medir la matriz de parámetros **S** del conjunto muestra y porta-muestra  $S_{MED}$  con el analizador de redes y calcular su matriz de parámetros  $T_{MED}$ , se puede escribir la ecuación siguiente:

$$T_{MED} = T_{PM} * T_M * T_{PM} \quad (8)$$

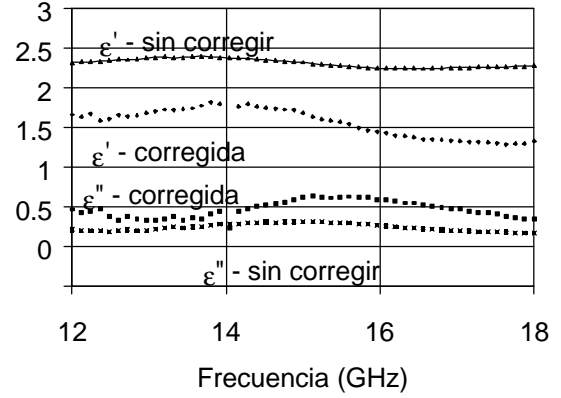
Resolviendo esta ecuación matricial para  $T_M$  y haciendo la transformación inversa a parámetros **S** mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{T_{22}} \begin{bmatrix} T_{12} & T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21} \\ 1 & -T_{21} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Obtenemos la matriz **S** correspondiente solo a la muestra.

$$S_M = \begin{bmatrix} S_{M11} & S_{M12} \\ S_{M21} & S_{M22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

El elemento de la matriz  $S_{M21}$  es igual al coeficiente de transmisión  $t$  definido en la ecuación (2) a partir del cual se puede realizar el cálculo de la permitividad de la muestra siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Para muestras con un alto contenido de humedad se espera que el coeficiente de transmisión sea muy bajo debido a la atenuación de la onda electromagnética ocasionada por el agua, debido a esto, la onda transmitida puede ser casi nula y en estas condiciones la incertidumbre se incrementa, en este caso, se puede seguir un procedimiento similar utilizando el coeficiente de reflexión en lugar del de transmisión.



**Figura 4. Mediciones de permitividad sobre una muestra de sílica gel al 0.17 % de humedad. Se muestran los resultados de medición del conjunto muestra porta-muestras (sin corregir) y de la muestra quitando el efecto del porta-muestras (corregida).**

#### MEDICIÓN CON EL METODO GRAVIMÉTRICO Y CON LA BALANZA DE INFRARROJO

Después de ser medidas por microondas la humedad de las muestras fue medida por el método gravimétrico, para lo cual las muestras fueron pesadas y posteriormente secadas en un horno a 150 °C durante el tiempo necesario para que calentamientos sucesivos mostraran un peso constante. La humedad de la muestra fue determinada de acuerdo a la siguiente ecuación:

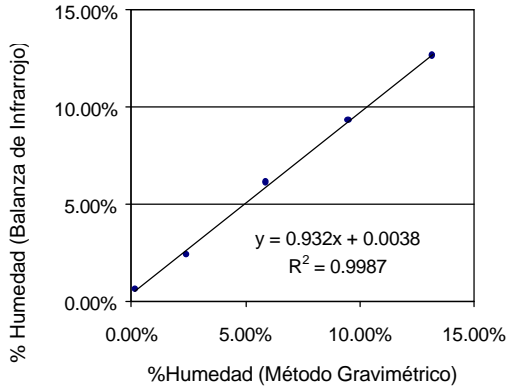
$$H = A/B \times 100 (\%) \quad (11)$$

Donde:

- $H$  – Porcentaje de humedad en base húmeda.
- $A$  – Pérdida de masa (masa de la muestra húmeda – masa de la muestra seca)
- $B$  – Masa original de la muestra (húmeda)

Las muestras de sílica gel se midieron por el método gravimétrico descrito y también utilizando una balanza de infrarrojo comercial la cual determina la humedad por diferencia de peso entre la muestra húmeda y la muestra seca como el método gravimétrico, sin embargo, la balanza de infrarrojo seca la muestra con luz infrarroja siendo la medición mas rápida (algunos minutos) en relación al método gravimétrico (algunas horas) y mas lento en relación a la medición por microondas (algunos segundos).

En la figura 5 se comparan los resultados obtenidos por el método gravimétrico en relación al método de la balanza de infrarrojo.



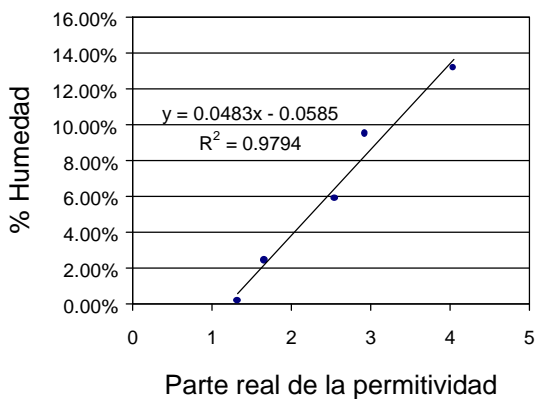
**Figura 5. Comparación entre las mediciones hechas con el método gravimétrico y con la balanza de infrarrojo.**

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

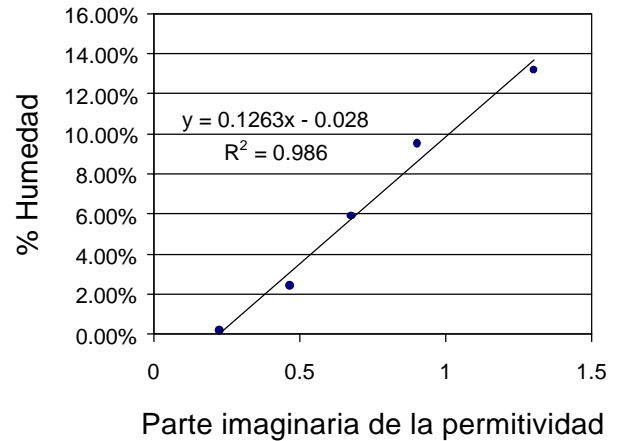
### Curvas de calibración:

Una vez que se conoce la permitividad de las muestras es necesario recurrir a curvas de calibración donde se relaciona la permitividad de la muestra con la humedad. En efecto, el método de medición de humedad en microondas usando antenas de corneta es un método relativo que debe ser calibrado contra un método de medición de humedad aceptado como el método gravimétrico. Es importante señalar que las curvas de calibración son diferentes para cada tipo de muestra.

A continuación se muestra la relación entre la parte real ( $\epsilon'$ ) e imaginaria ( $\epsilon''$ ) de la permitividad de muestras de sílica gel a diversas humedades para una frecuencia de 12 GHz. Curvas similares se obtuvieron en el intervalo de frecuencias de medición (12 GHz a 18 GHz). Estas curvas sirven para conocer la humedad de la muestra en base a mediciones de permitividad.



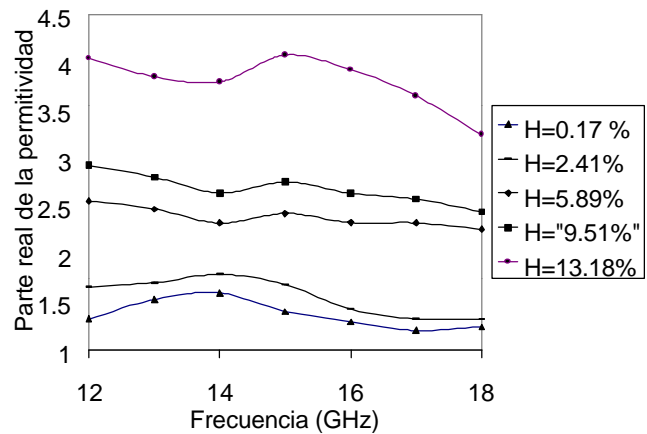
**Figura 6. Relación entre el humedad y la parte real de la permitividad. Mediciones en una muestra de sílica gel a 12 GHz.**



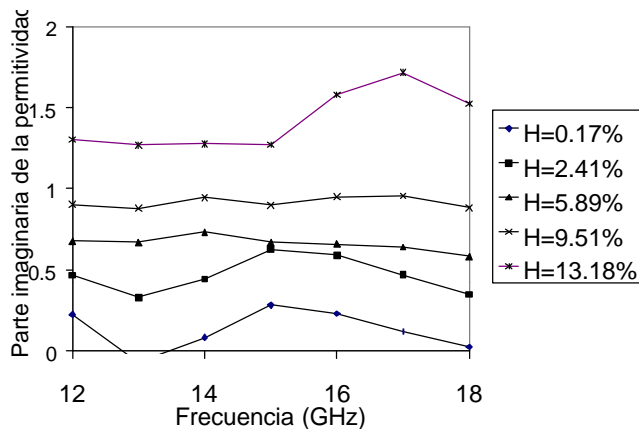
**Figura 7. Relación entre el la humedad y la parte imaginaria de la permitividad. Mediciones en una muestra de sílica gel a 12 GHz.**

### Permitividad en función de la frecuencia para diferentes humedades

A continuación se muestran curvas de mediciones de la parte real e imaginaria de la permitividad en función de la frecuencia para diversos valores de humedad.



**Figura 8. Parte real de la permitividad en función de la frecuencia para diversos valores de humedad. Mediciones hechas en una muestra de sílica gel.**



**Figura 9. Parte imaginaria de la permitividad en función de la frecuencia para diversos valores de humedad. Mediciones hechas en una muestra de sílica gel.**

## CONCLUSIONES

Se desarrollo un sistema para realizar mediciones instantáneas de humedad en microondas por medio de antenas de corneta en muestras sólidas, en forma de polvo o granos, sin contacto con la muestra.

El método para corregir el efecto del porta-muestras en las mediciones funcionó, sin embargo, mejoras adicionales a este método son posibles. Estas mejoras podrían ser: mejorar la simetría del sistema de medición y considerar los múltiples rebotes de las ondas electromagnéticas ocurridos debido a las interfaces entre la muestra, el porta-muestras y el aire.

Se encontró un buen acuerdo entre el método gravimétrico y la balanza de infrarrojo para la medición de la humedad de las muestras de sílica gel excepto para muy bajos valores de humedad como muestra la figura 5.

En las figuras 6 y 7 se observa que tanto la medición de la parte real como de la imaginaria de la permitividad sirven para determinar la humedad de la muestra, sin embargo, es necesario disminuir la dispersión de las mediciones para lograr niveles de incertidumbre comparables a los métodos gravimétrico y balanza de infrarrojo.

En la figura 8 se observa en el intervalo de frecuencias de 15 GHz a 18 GHz que la pendiente de

la curva aumenta al aumentar la humedad, este parece ser un efecto de permitividad del agua cuya parte real disminuye con la frecuencia en este intervalo debido a la relajación dieléctrica que ocurre alrededor de 19 GHz. En la figura 9 se observa el efecto contrario debido a que la parte imaginaria de la permitividad del agua aumenta en el mismo intervalo de frecuencias debido también a la relajación dieléctrica del agua.

Trabajo adicional será necesario para medir el contenido de humedad independientemente de la densidad de la muestra, este es un problema a resolver importante para la posible aplicación del método en líneas de producción. Será necesario investigar el efecto del espesor de la muestra. Será necesario desarrollar un prototipo de bajo costo si se quiere utilizar el método de medición a nivel industrial. Trabajo futuro nos permitirá determinar los niveles de incertidumbre del método de medición.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo financiero para la realización de este proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] I. García, C.D. Avilés, H. Jardón, Sistema de Medición de Permitividad Compleja en el intervalo de 12 GHz a 18 GHz usando antenas de microondas.
- [2] I. García Ruiz, D. Avilés Castro, H. Jardón Aguilar, *XXV Años de Ingeniería Física en México*, "Espectroscopía dieléctrica en microondas y sus aplicaciones", UAM-Azcapotzalco, (1999).
- [3] I. García, "Perspectivas del uso de la técnica TRL en calibración de analizadores de redes vectoriales en el laboratorio de alta frecuencia", por publicarse en las memorias del Seminario de Metrología Eléctrica del CENAM año 2000.
- [4] R.W. Beatty "Applications of waveguide and circuit theory to the development of accurate microwave measurement methods and standards", NBS monograph 137, 1973, (p 54,56).
- [5] Measuring Noninsertable Devices, Product Note 8510-13, Hewlitt-Packard Co.